



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนผังห้องสะอาดที่เหมาะสมสำหรับลดการปนเปื้อนของอนุภาค

ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Optimum clean room layout for reducing particle contamination

by computational fluid dynamics

ผศ.ดร.จตุพร ทองศรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



T145327

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนผังห้องสะอาดที่เหมาะสมสำหรับลดการปนเปื้อนของอนุภาค

ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Optimum clean room layout for reducing particle contamination

by computational fluid dynamics

ผศ.ดร.จตุพร ทองศรี

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน

14532

รับเดือนปี

4 ก.พ. 2560

b.	12830148
i.	.....

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)...แผนผังห้องสะอาดที่เหมาะสมสำหรับลดการปนเปื้อนของอนุภาคด้วยพลศาสตร์  
ของไหลเชิงคำนวณ

แหล่งเงิน...รายได้...

ประจำปีงบประมาณ...2559...จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน...70,000...บาท

ระยะเวลาการทำวิจัย...1...ปี ตั้งแต่...1...ตุลาคม 2558...ถึง 30 กันยายน 2559...

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ พร้อมระบุหน่วยงานต้นสังกัด

ผศ.ดร.จตุพร ทองศรี วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องผลิตในห้องสะอาดที่ได้มาตรฐานมีการปนเปื้อนของอนุภาคน้อยที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จำลองการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดของโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แห่งหนึ่งที่ยังวางแผนจะถูกปรับปรุง เพื่อหาแผนผังการจัดวางเครื่องจักรในห้องสะอาดที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมจริงของโรงงาน เราได้สร้างแบบจำลองห้องสะอาด 2 แบบตามแผนผังและตามความต้องการของโรงงาน ผลการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแสดงการไหลของอากาศ และร่องรอยอนุภาคภายในห้องสะอาดของแต่ละแผนผัง ผลการจำลองเหล่านี้สอดคล้องกับข้อมูลเบื้องต้นที่ทางโรงงานรวบรวมไว้ ผลการวิเคราะห์นำไปสู่การตัดสินใจเลือกรูปแบบการวางเครื่องจักรที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ปัจจุบันผลจากงานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับการปรับปรุงห้องสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

คำสำคัญ: ห้องสะอาด พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การปนเปื้อน การไหลของอากาศ การผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Optimum cleanroom layout for reducing particle contamination by computational fluid dynamics

**Researcher:** Asst. Prof. Dr. Jatuporn Thongsri

**Address:** College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

Hard disk drive (HDD) production needs to be manufactured in a clean room that keep particulate contamination to the minimum. Therefore, this research aimed to apply the computational fluid dynamics (CFD) to simulate airflow inside a clean room of an HDD factory that planned to be renovated. To find the optimal placement of machinery under actual environmental conditions of the factory, 2 models of clean room subject to the layout and the requirement of factory were created. The results from CFD simulation revealed airflow and particle traces inside the clean room of each model. These results agree with preliminary data collected by the factory. Analytical results lead to the decision to choose the optimal placement of machinery with efficiency to reduce particle contamination in the manufacturing process. Presently, the results from this research are applied to practical applications for renovation of HDD manufacturing clean room.

**Keywords:** clean room, computational fluid dynamics, contamination, airflow, manufacturing

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ การใช้เครื่องมือ เครื่องคอมพิวเตอร์ และการประสานงาน ได้รับเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดีจากเจ้าหน้าที่ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง ทั้งหมดนี้ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้วิจัย  
กันยายน 2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข

กิตติกรรมประกาศ..... ค

สารบัญ..... ง

สารบัญรูปภาพ..... จ

สารบัญตาราง..... ฉ

บทที่ 1: บทนำ..... 1

    1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเนื้อหา..... 1

    1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 1

    1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2

    1.4 วิธีดำเนินการวิจัย..... 2

    1.5 คำสำคัญ..... 2

บทที่ 2: แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 3

บทที่ 3: วิธีดำเนินการวิจัย..... 5

    3.1 การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศ..... 5

    3.2 การวิเคราะห์การไหลของอากาศ..... 5

    3.3 การวิเคราะห์อนุภาคปนเปื้อนในห้องสะอาด..... 6

บทที่ 4: ผลการวิจัยและการอภิปราย..... 8

    4.1 ผลการวิจัยของแบบจำลองห้องสะอาด A..... 8

    4.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองห้องสะอาด A และ B..... 11

บทที่ 5: สรุปผลการวิจัย..... 12

บทที่ 6: ผลผลิตที่ได้จากการวิจัย..... 14

เอกสารอ้างอิง..... 15

ภาคผนวก..... 16

    เอกสารหมายเลข 1..... 17

    เอกสารหมายเลข 2..... 23

เอกสารนี้เปิดเผยฉบับจริงใช้เฉพาะเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขในโปรแกรมคอมพิวเตอร์  
 'ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้'

## สารบัญรูปร่าง

หน้า

รูปที่ 1 (a)แบบจำลองสามมิติจากแผนผังห้องสะอาดA (b)แบบจำลองสามมิติจากแผนผังห้องสะอาดB...6	
(c) แบบจำลองห้องสะอาดแบบเครื่องจักรยกพื้น (d) แบบจำลองห้องสะอาดแบบเครื่องจักรไม่ยกพื้น	
รูปที่ 2 แบบจำลองเมฆของห้องสะอาด A และ B.....7	
รูปที่ 3 (a) แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลของอากาศแบบเครื่องจักรยกพื้น.....9	
(b) แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลของอากาศแบบเครื่องจักรไม่ยกพื้น6	
รูปที่ 4 เวกเตอร์แสดงทิศทางของอนุภาคบนเส้นทางที่เคลื่อนที่ตามการไหลของอากาศ.....10	
รูปที่ 5 จำนวนอนุภาคที่ยังคงเหลืออยู่ในห้องสะอาดสำหรับเครื่องจักรสองกรณี.....10	
รูปที่ 6 แสดงจำนวนอนุภาคที่ยังคงเหลืออยู่ในห้องสะอาดสำหรับเงื่อนไข 1-3.....10	
รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลของอากาศที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นห้อง.....12	
รูปที่ 8 แสดงบริเวณที่อากาศมีความเร็วสูงกว่า 0.2 m/s.....12	
รูปที่ 9 แสดงเส้นทางจำลองร่องรอยของอนุภาคจำนวน 6,000 อนุภาค.....12	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เงื่อนไขอากาศไหลเข้า.....	7
ตารางที่ 2 เงื่อนไขอากาศไหลออกในแบบจำลองห้องสะอาดที่ A.....	7
ตารางที่ 3 เงื่อนไขอากาศไหลออกใช้เปรียบเทียบห้องสะอาด A และ B.....	7
ตารางที่ 4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วลม.....	9
ตารางที่ 5 จำนวนอนุภาคคงเหลือในห้องสะอาดเฉลี่ย จากการจำลองปล่อยอนุภาค.....	12
สแตนเลส 150,000 อนุภาค จำนวน 50 ครั้ง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเนื้อหา

ห้องสะอาดมีความจำเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตขั้นสูงเช่นอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ฯลฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ชิ้นส่วนทั้งหมดต้องผลิตในห้องสะอาดที่มีความสะอาดตรงตามเกณฑ์มาตรฐานที่ US FED STD 209E กำหนด เช่นคลาส 1,000 อนุญาตให้มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมครอนได้ไม่เกิน 1,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต หรือคลาส 100 อนุญาตให้มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมครอนได้ไม่เกิน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต ห้องสะอาดเหล่านี้ต้องมีการควบคุมการผลิตให้มีการปนเปื้อน (contamination) น้อยที่สุด ผลิตภัณฑ์จึงจะได้มาตรฐานสำหรับส่งขายต่อไป จากประสบการณ์การทำงานร่วมกับอุตสาหกรรมมานานกว่า 4 ปี พบว่าปัญหาเรื่องการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในขณะผลิตเป็นปัญหาเร่งด่วน ต้องมีการศึกษา วางแผน และแก้ปัญหาโดยเร็ว โดยพื้นฐานที่สุดสำหรับใช้ในการแก้ปัญหาเรื่องนี้คือ ต้องมีการศึกษารูปแบบการไหลของอากาศ (Airflow) ในห้องสะอาด เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่จะมีผลต่อการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจริง เช่น แผนผังของห้องสะอาด ตำแหน่งการจัดวางเครื่องจักร อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ตลอดจนระบบการระบายอากาศ (System of Ventilation)

ที่ผ่านมาทางผู้วิจัยได้เคยมีงานวิจัยร่วมกับทางโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการตรวจสอบการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดแห่งหนึ่งเพื่อหาวิธีควบคุมการปนเปื้อนที่อาจจะเกิดขึ้น ซึ่งผลการตรวจสอบทั้งหมดได้ถูกส่งให้ทางอุตสาหกรรมซึ่งทางโรงงานยอมรับ และนำผลการวิจัยไปใช้ในการปรับปรุงห้องสะอาดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ผลงานวิจัยที่กล่าวถึงนี้ ใช้เงื่อนไขจริงของทางโรงงาน (actual condition) แต่ยังไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอื่นๆ รวมทั้งยังไม่ได้หาเงื่อนไขที่ดีที่สุด (optimization) เช่น ความสูงของเครื่องจักรจากพื้นที่เหมาะสม รูปแบบการวางเครื่องจักร ระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ ฯลฯ ซึ่งหากมีการต่อยอดศึกษาสิ่งเหล่านี้ในเชิงลึก ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยการเพิ่มรายละเอียดอื่นๆที่เป็นเงื่อนไขที่ใช้ได้สำหรับห้องสะอาดทั่วไป ผลที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับปรับปรุงห้องสะอาดอื่นๆให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถลดการปนเปื้อนประยุกต์ใช้สำหรับอุตสาหกรรมต่างๆได้ และยังสามารถนำไปตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่ได้รับการยอมรับได้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อจำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาดภายใต้เงื่อนไขที่สนใจด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. เพื่อศึกษาผลของความสูงจากพื้นของเครื่องจักร รูปแบบการวางเครื่องจักร และระบบระบายอากาศ ต่อรูปแบบการไหลของอากาศในห้องสะอาด
3. เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของรูปแบบการไหลของอากาศที่สามารถลดการปนเปื้อนของอนุภาคในห้องสะอาดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ได้รูปแบบการไหลของอากาศในห้องสะอาดภายใต้เงื่อนไขที่สนใจ
2. ได้ผลของความสูงจากพื้นของเครื่องจักร รูปแบบการวางเครื่องจักร และระบบระบายอากาศต่อรูปแบบการไหลของอากาศในห้องสะอาด
3. ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่ให้รูปแบบการไหลของอากาศมีประสิทธิภาพลดการปนเปื้อนของอนุภาคได้

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. วาดแบบจำลองของแผนผังห้องสะอาดตามเงื่อนไขที่สนใจในคอมพิวเตอร์
2. สร้างแบบจำลองเมชที่เหมาะสม และกำหนดเงื่อนไขทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง
3. วัดค่าความเร็วลมจากช่องระบายอากาศเข้า-ออกต่างๆ ในห้องสะอาดจริง เพื่อนำค่ามาคำนวณด้วย CFD ตามเงื่อนไขที่สนใจ
4. คำนวณความเร็วลมจากข้อมูลที่วัด โดยใช้สูตรจากทฤษฎี
5. เปรียบเทียบผลที่ได้จาก CFD และที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี
6. เปรียบเทียบผลทิศทางการไหลของอากาศและปริมาณอนุภาคปนเปื้อนที่ได้จาก CFD จากเงื่อนไขต่างๆ
7. วิเคราะห์ อภิปราย และสรุปผลการคำนวณ
8. สรุปและเขียนรายงานโครงการ

### 1.5 คำสำคัญ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, ห้องสะอาด, ทิศทางการไหลของอากาศ, อนุภาคปนเปื้อน

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบการไหลของอากาศในห้องสะอาดด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หาได้จากการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของสมการอนุรักษ์ (conservation equations) และสมการความปั่นป่วน (turbulence equations) ซึ่งรูปแบบของสมการอนุรักษ์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)-(3)

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_j} = -\epsilon \frac{\partial}{\partial x_i} + F_\epsilon + \frac{\partial[\tau_{ij}]}{\partial x_j} + \frac{\partial(-\overline{\rho u_i \epsilon})}{\partial x_j} + \frac{\partial(-\overline{\rho u_i^2})}{\partial x_i} + S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(\rho + P)]}{\partial x_i} = \frac{\partial(k)_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} + u_i(u_i)_s \quad (3)$$

เมื่อ  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ  $t$  คือเวลา  $\tau_{ij}$  คือเทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor)  $S$  คือเทอมของแหล่งกำเนิด (Source Term)  $p$  คือความดันสถิตย์ (Static Pressure) และ  $E$  คือพลังงาน

ส่วนร่องรอยของอนุภาค (particle trace) คำนวณจากสมการสมดุลแรงอนุภาค (particle force balance equation) ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (4)

$$du_x/dt = F_D(u_g - u_p) + g(x_x - \rho_g)/\rho_p + F_L \quad (4)$$

เมื่อสัญลักษณ์ตัวห้อย  $p$  แทนอนุภาค  $g$  แทนของเหลว  $\rho$  คือความหนาแน่น  $u$  แทนความเร็ว  $F_D$  คือแรงลาก (Drag Force)  $F_L$  คือแรงอื่นๆที่มากกระทำกับอนุภาคเช่น แรงมวลเสมือน (virtual mass force) แรงยก (lift force) แรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (attractive force between particles) ฯลฯ แต่แรงเหล่านี้ไม่มีผลกับอนุภาคขนาดเล็กที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เนื่องจาก  $\rho_p \gg \rho_g$

ในงานวิจัยนี้ เราจะใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ได้แก่ ความสูงจากพื้นของเครื่องจักร รูปแบบการวางเครื่องจักร และระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพลดการปนเปื้อนของอนุภาคได้ในห้องสะอาดตัวอย่าง เราจะใช้รูปแบบการจำลองทางเดียว (One way simulation) นั่นคือ คำนวณเพื่อหารูปแบบการไหลของอากาศก่อน, เราเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Shear Stress Transport Turbulence ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับในภาคอุตสาหกรรม เมื่อกำหนดเงื่อนไขที่เป็นครบถ้วน คอมพิวเตอร์จะแก้ 3 สมการอนุรักษ์ และ 4 สมการความปั่นป่วน รวมทั้งหมด 7 สมการ โดยอาศัยหลักการของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method, FVM) หลังจากได้รูปแบบการไหลของอากาศแล้ว จึงจำลองการปล่อยอนุภาคเพื่อคำนวณหาร่องรอยการเคลื่อนที่ตามสมการ (4) แล้วจึงรายงานผลในรูปแบบของเจดสีเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้เสนอทางโรงงานว่าควรใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) จำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาดภายใต้เงื่อนไขจริงที่ได้จากโรงงานเช่น แผนผังของห้องสะอาด ระบบการไหลของอากาศภายใน ตำแหน่งการจัดวางเครื่องจักร และเงื่อนไขระบบระบายอากาศ ซึ่งคาดว่าจะผลการจำลองที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์หาเงื่อนไขต่างๆที่เหมาะสม เพื่อใช้ปรับปรุงระบบการผลิตให้มีประสิทธิภาพลดการปนเปื้อนของอนุภาคที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ดังจะ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้จากการประยุกต์ใช้ CFD ในงานทางด้านนี้มากมายเช่น Noh และคณะ (Noh et al., 2010) ได้ใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาดของอุตสาหกรรมการผลิตจอ LCD ผลการจำลองสามารถนำไปใช้ลดการปนเปื้อนของอนุภาคขณะผลิตได้ Lui และคณะ (Lui et al., 2009) ได้ใช้ CFD ศึกษาผลของคอมไฟผ่าตัดที่มีต่อการไหลของอากาศในห้องผ่าตัดซึ่งสามารถลดการติดเชื้อในห้องผ่าตัดได้ และเมื่อไม่นานมานี้ คณะผู้วิจัย (Thongsri et al., 2014, 2015) ได้ใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศและร่องรอยของอนุภาคในเครื่องจักรเพื่อหาเงื่อนไขการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้จริง

ในงานวิจัยนี้จะใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาด 2 แบบที่คาดว่าจะมีความเหมาะสมจะนำไปใช้เป็นแบบในการปรับปรุงห้องสะอาดในปัจจุบัน ภายใต้เงื่อนไขการระบายอากาศจริงที่รวบรวมได้จากห้องสะอาดของโรงงานอุตสาหกรรม ผลการจำลองจะถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยเทียบกับที่ได้จากทางทฤษฎี หลังจากนั้นจะนำไปเปรียบเทียบ และวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบแผนผัง และเงื่อนไขการไหลอากาศที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของอนุภาค เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงห้องสะอาดของโรงงานที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นต่อไป



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เราได้นำแผนผังห้องสะอาดจากโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสไดรฟ์ 2 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 1(a) และ 1(b) มาทำการศึกษาโดยแบ่งกระบวนการวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1.) สร้างแบบจำลองการไหลของอากาศ 2.) การวิเคราะห์การไหลของอากาศ และ 3.) การวิเคราะห์การปนเปื้อนของอนุภาคปนเปื้อนในห้องสะอาด ซึ่งจะศึกษาแบบจำลองห้องสะอาดในแบบที่หนึ่งก่อน โดยเงื่อนไขการทดลองจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อ คือ 1. การวิเคราะห์การไหลของอากาศและการปนเปื้อนของอนุภาคจากโมเดลห้องสะอาดยกพื้นและโมเดลห้องสะอาดไม่ยกพื้น ซึ่งแสดงในรูป 1(c) และ 1(d) 2. การวิเคราะห์การไหลของอากาศและการปนเปื้อนของอนุภาคจากเงื่อนไขความเร็วลมเข้า-ออกที่ช่องระบายอากาศที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 และเมื่อได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ห้องสะอาดแบบที่ 1 แล้ว จึงนำเงื่อนไขนั้นมาดำเนินการในแบบจำลองห้องสะอาดแบบที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบโดยเงื่อนไขจะแสดงในตารางที่ 3

#### 3.1 การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศ

- 3.1.1 วาดแบบจำลองของห้องสะอาดสองห้องแบบเครื่องจักรยกพื้นและไม่ยกพื้นในคอมพิวเตอร์
- 3.1.2 แปลงแบบจำลองของแข็งที่วาดให้เป็นแบบจำลองของไหลและสร้างแบบจำลองเมชของห้องสะอาดทั้ง 2 ในโปรแกรม ANSYS แสดงดังรูปที่ 2
- 3.1.3 วัดค่าความเร็วลมเข้าและออกจากช่องระบายอากาศในห้องสะอาดจริง แล้วนำมาคำนวณเพื่อสร้างเงื่อนไขใหม่ 3 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2
- 3.1.4 กำหนดเงื่อนไขจาก 3.1.3 รวมทั้งเงื่อนไขเริ่มต้นที่จำเป็น ให้กับโปรแกรม ANSYS
- 3.1.5 คำนวณ และวิเคราะห์ความถูกต้องคำตอบที่ได้โดยเปรียบเทียบความเร็วลมจาก CFD และการคำนวณจากทฤษฎี

หลังจากที่โปรแกรมคำนวณผลเสร็จ เพื่อที่จะยืนยันความถูกต้องของผลดังกล่าว เราได้ทำการวิเคราะห์ความเร็วลมที่จุดต่างๆ ในแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งมีความสอดคล้องกัน แสดงว่าแบบจำลอง และกระบวนการวิเคราะห์ รวมถึงการกำหนดค่าต่างๆ ในโปรแกรม ANSYS มีความน่าเชื่อถือ เราจึงวิเคราะห์การไหลของอากาศและอนุภาคปนเปื้อนในหัวข้อต่อไป

#### 3.2 การวิเคราะห์การไหลของอากาศ

- 3.2.1 สร้างระนาบตัดผ่านบริเวณที่สนใจ 3 บริเวณ คือ zone1, zone2 และ zone3 ซึ่งเป็นบริเวณที่ตรงกับเครื่องจักรและช่องระบายอากาศเข้าและออก
- 3.2.2 สร้างแบบจำลองทิศทางการไหลของอากาศ โดยให้แสดงผลบนระนาบจากข้อ 3.2.1
- 3.2.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบความเร็วลมและการเกิดการหมุนวนของอากาศในแต่ละจุดจากเงื่อนไขต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อสุดท้าย สาเหตุที่เราวิเคราะห์การเกิดอากาศหมุนวนและความเร็วลมที่จุดต่างๆ เนื่องจากเราได้ศึกษาจากงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องและจากคำแนะนำของนักวิจัยในโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสไดรฟ์ ซึ่งบริเวณที่เกิดอากาศหมุนวนจะเกิดการปนเปื้อนอนุภาคมาก และความเร็วมวลที่วิศวกรรมในโรงงานต้องการคือ 0.2 m/s เราจึงใส่ทั้งสองอย่างนี้ในการวิเคราะห์การไหลของอากาศ

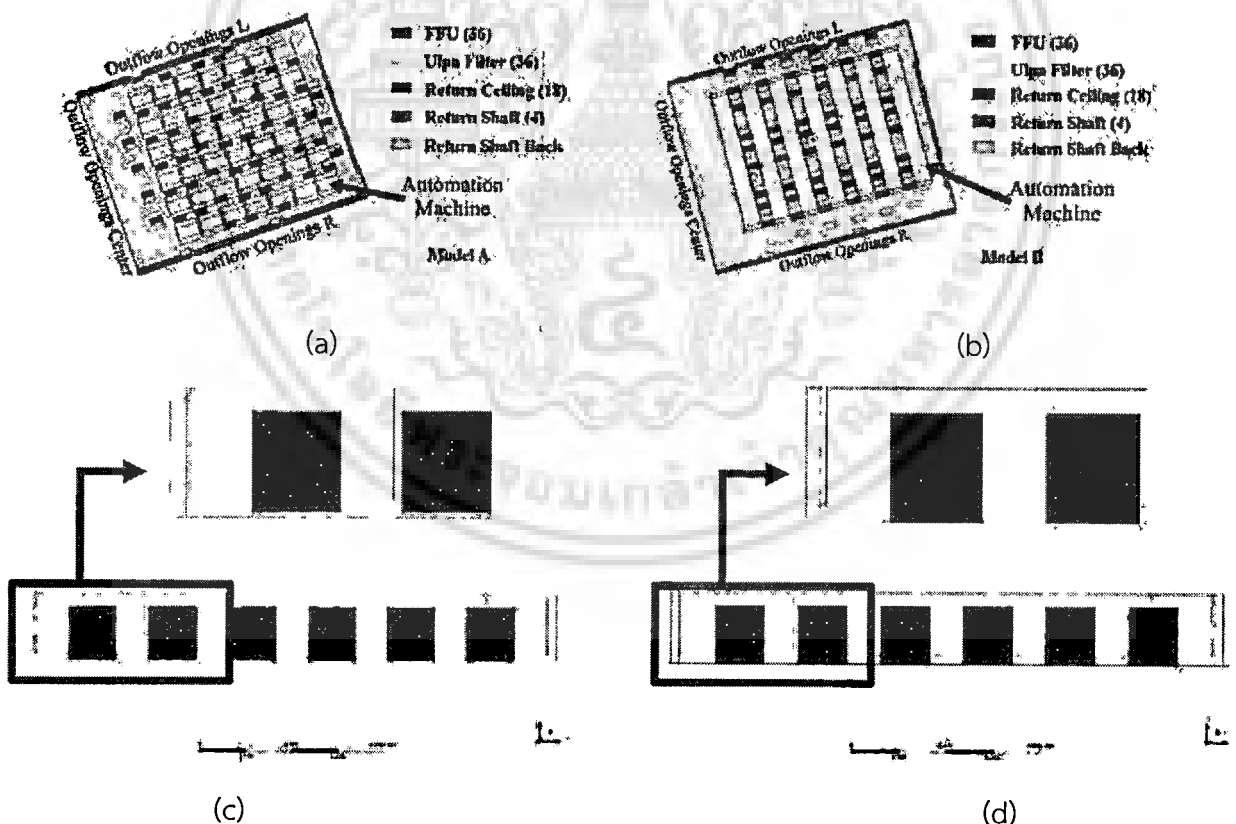
### 3.3 การวิเคราะห์อนุภาคปนเปื้อนในห้องสะอาด

3.3.1 เลือกเครื่องจักรอัตโนมัติบริเวณที่สนใจเพื่อปล่อยอนุภาคปนเปื้อน คือ zone1, zone2 และ zone3

3.3.2 กำหนดคุณสมบัติของอนุภาคที่ต้องการปล่อย จำนวนครั้งที่ปล่อย และจำนวนอนุภาคที่ปล่อยในแต่ละครั้ง โดยเราปล่อย อนุภาค Aluminum alloy รัศมี 0.5 ไมครอน จำนวน 10 ครั้ง อนุภาคทั้งหมด 150,000 ต่อหนึ่งบริเวณ

3.3.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณอนุภาคปนเปื้อนที่ตกค้างในแต่ละพื้นที่จากเงื่อนไขต่างๆ

ในการวิเคราะห์การปนเปื้อนจากประสบการณ์ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแหล่งกำเนิดอนุภาคปนเปื้อนคือการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติและการเคลื่อนไหวของมนุษย์ ดังนั้นเราจึงกำหนดให้ปล่อยอนุภาคจากเครื่องจักร



รูปที่ 1 (a) แบบจำลองสามมิติจากแผนผังห้องสะอาด A

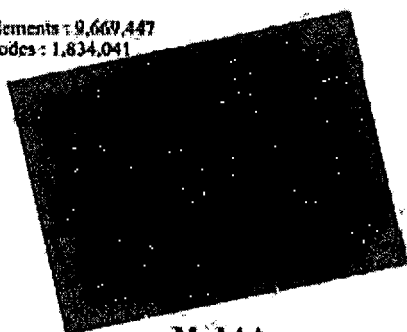
(b) แบบจำลองสามมิติจากแผนผังห้องสะอาด B

(c) แบบจำลองห้องสะอาดแบบเครื่องจักรยกพื้น

และ (d) แบบจำลองห้องสะอาดแบบเครื่องจักรไม่ยกพื้น

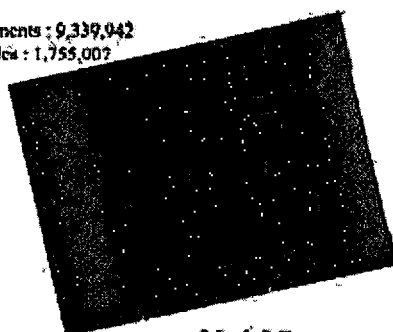
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Elements : 9,669,447  
Nodes : 1,834,041



**Model A**

Elements : 9,339,942  
Nodes : 1,755,007



**Model B**

รูปที่ 2 แบบจำลองเมชของห้องสะอาด A และ B

ตารางที่ 1 เงื่อนไขอากาศไหลเข้า

Inlet (ตัวที่)	Size (m <sup>2</sup> )	Temp (°C)	Mass Flow Rate (kg/s)
FFU	1.2x0.6	13	11.43
Ulpa Filter	1.2x0.6	20.5	11.49

ตารางที่ 2 เงื่อนไขอากาศไหลออกในแบบจำลองห้องสะอาดที่ A

Inlet	Size (m <sup>2</sup> )	Numbers	Percentage of total outflow		
			Condition 1	Condition 2	Condition 3
Return air grille	1.2x0.6	18	45	43	39
Return air shaft, back side	1.1x0.4	12	18	16	14
Return air shaft, L1 and L2	1.1x0.4	2	8(6)	6(4)	5(3)
Return air shaft, R1 and R2	1.1x0.4	2	8(7)	6(5)	5(4)
Outflow Openings, L and R	40x3	2	2(2)	6(6)	8(8)
Outflow Opening, Center	20.4x3	1	4	8	14

ตารางที่ 3 เงื่อนไขอากาศไหลออกใช้เปรียบเทียบห้องสะอาด A และ B

Outlet	Size (m <sup>2</sup> )	Outflow (%)	Outlet	Size (m <sup>2</sup> )	Outflow (%)
Return Grille	1.2x0.6	39	Return Shaft R1(R2)	1.1x0.4	5(4)
Return Shaft Back	1.1x0.4	14	Outflow L(R)	40x3	8(8)
Return Shaft L1(L2)	1.1x0.4	5(3)	Outflow Center	20.4x3	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปราย

เราได้ทำการสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด A และ B โดยได้เริ่มทำการจำลองเงื่อนไขความเร็วลมของช่องระบายอากาศและการวางฐานเครื่องจักรอัตโนมัติที่แตกต่างกันในแบบจำลองห้องสะอาด A โดยจะแสดงผลการทดลองใน 4.1 และผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองห้องสะอาด A และ B ใน 4.2

#### 4.1 ผลการวิจัยของแบบจำลองห้องสะอาด A

ก่อนจะทำการจำลองการไหลของอากาศและจำลองการปนเปื้อนของอนุภาคนั้นเราได้ทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วลมที่ช่องระบายอากาศระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎีพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 3.33% ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ โดยจะแสดงผลการคลาดเคลื่อนในตารางที่ 4

จาก 3.2 การวิเคราะห์การไหลของอากาศ เพื่อต้องการเปรียบเทียบการไหลของอากาศของเครื่องจักรแบบยกพื้นกับเครื่องจักรแบบติดพื้น รูปที่ 3 แสดง air velocity vector ของเครื่องจักรแบบ (a) (platform) และแบบ (b) ground จากรูปจะเห็นได้ว่า แบบยกพื้น อากาศที่ไหลมีความเร็วต่ำ และมีโอกาสเกิดบริเวณที่มีอากาศไหลวน (vortex) บริเวณด้านข้างได้ง่ายกว่าเครื่องจักรที่ไม่มียกพื้น

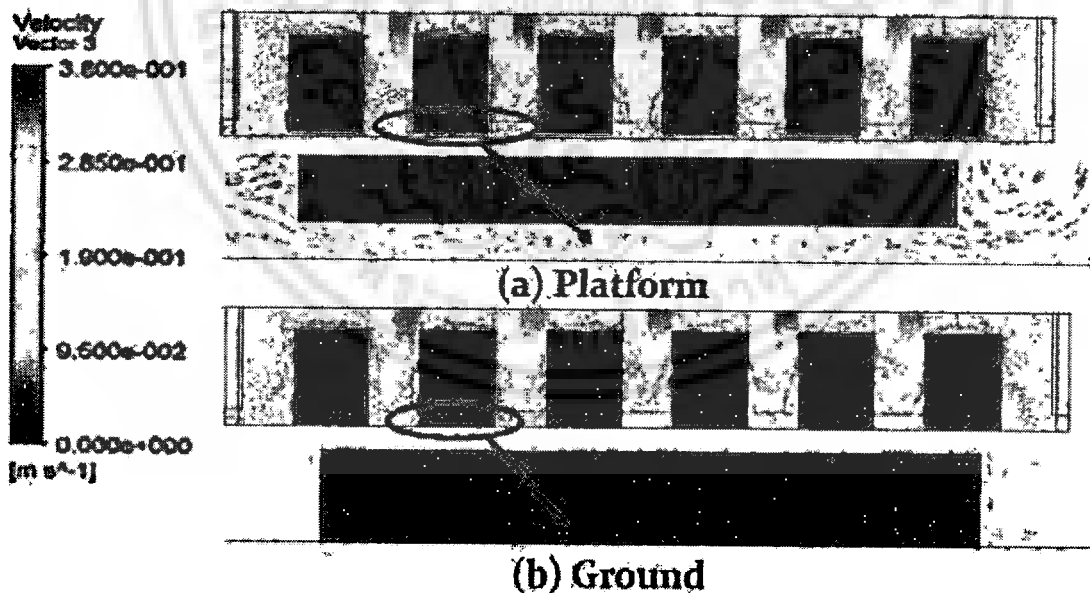
จาก 3.3 การวิเคราะห์อนุภาคปนเปื้อนในห้องสะอาด เพื่อให้ได้ข้อมูลจำนวนอนุภาคที่ยังค้างในห้องสะอาด เราได้จำลองโดยปล่อยอนุภาค stainless steel จำนวน 6,000 อนุภาค โดยใช้ discrete phase model จากตำแหน่งเครื่องจักรทั้ง 3 โซน นั่นคือ zone1 หลังห้อง zone2 กลางห้อง zone3 หน้าห้อง ทีละโซน ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4 จากรูปที่ 4 อนุภาคที่ถูกปล่อยจากเครื่องจักรในโซนต่างๆเกือบทั้งหมด จะถูกอากาศที่ไหลจากระบบระบายอากาศพัดพาให้ออกไปทาง return shaft, return shaft back และ return grille โดยสีแสดงถึงเวลาที่อนุภาคอยู่ในห้องสะอาดมีหน่วยเป็นวินาที อนุภาคส่วนน้อยที่ยังคงค้างอยู่ในห้องสะอาด อาจมีสาเหตุจากการเกิด vortex ภายใน หรืออากาศในบริเวณนั้นมีความเร็วที่ต่ำมาก จนระบบปรับอากาศไม่สามารถกำจัดออกไปได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลของอนุภาคที่ยังค้างอยู่ในห้องสะอาดละเอียดขึ้น เราได้ปล่อยอนุภาค stainless steel จำนวน 150,000 อนุภาคที่โซนต่างๆจำนวนโซนละ 50 ครั้ง แล้วนับจำนวนอนุภาคที่ยังค้างซึ่งผลการนับดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อปล่อยอนุภาคจากเครื่องจักรทั้ง 3 โซนแล้วส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปจากห้องสะอาดซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4 โดยมีอนุภาคส่วนน้อยเท่านั้นที่ยังคงอยู่ไม่เกิน 420 อนุภาค โดยเครื่องจักรแบบ ground จะมีอนุภาคตกค้างอยู่ในห้องสะอาดน้อยกว่าแบบยกพื้น 10 cm ทางโรงงานพอใจเป็นอย่างมาก เพราะการสร้างห้องสะอาดแบบ ground ใช้งบประมาณน้อยกว่าแบบ platform มาก เนื่องแบบ platform ต้องติดตั้งขายกพื้นซึ่งติดตั้งตามหลัก vibration ที่ใช้งบประมาณสูง

ในทำนองเดียวกัน เมื่อใช้แบบจำลองห้องสะอาดแบบไม่ยกพื้นจำลองภายใต้เงื่อนไขทั้งระบบระบายอากาศที่แตกต่างกัน 3 แบบดังตาราง 2 เพื่อจำลอง particle trace ที่เกิดขึ้นโดยการปล่อยอนุภาคจากเครื่องจักรทั้ง 3 โซน แล้วนับอนุภาคที่ค้างอยู่ห้องสะอาดผลเป็นดังรูปที่ 6 ผลการจำลองแสดงจำนวนอนุภาคค้างอยู่ในห้องสะอาดที่แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละโซนได้รับอิทธิพลจาก Return Grille, Return Shaft ที่ไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกัน เมื่อนำจำนวนอนุภาคที่คงค้างอยู่มาค่าเฉลี่ย เราพบว่าเงื่อนไขที่ 3 อนุภาคเหลือน้อยที่สุด จึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ได้แนะนำให้กับทางโรงงานอุตสาหกรรมไปปรับปรุงระบบระบายอากาศของ ห้องสะอาดที่จะปรับปรุงใหม่ โดยทางโรงงานให้การยอมรับ เนื่องจากสอดคล้องกับ Empirical Test บางอย่างที่ทางโรงงานได้เก็บข้อมูลไว้ ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ ปัจจุบันได้นำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการปรับปรุง ห้องสะอาดดังกล่าวเรียบร้อยแล้ว

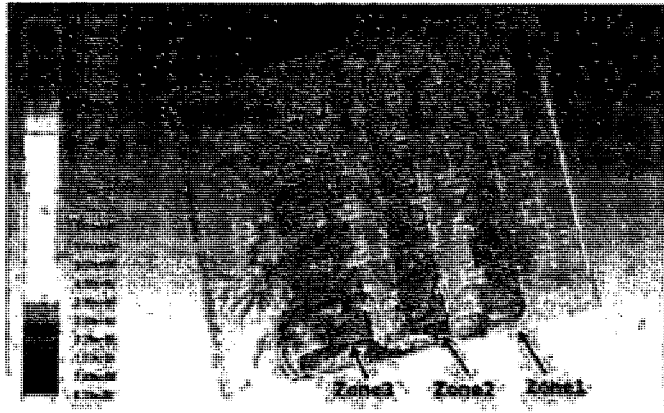
ตารางที่ 4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วลม

Shaft	Velocity (m/s)		Error
	Theoretical	Simulated	
Return shaft L1	2.40	2.48	3.33%
Return Shaft L2	1.58	1.62	2.53%
Return Shaft R1	2.40	2.47	2.92%
Return Shaft R2	1.97	20.2	2.54%

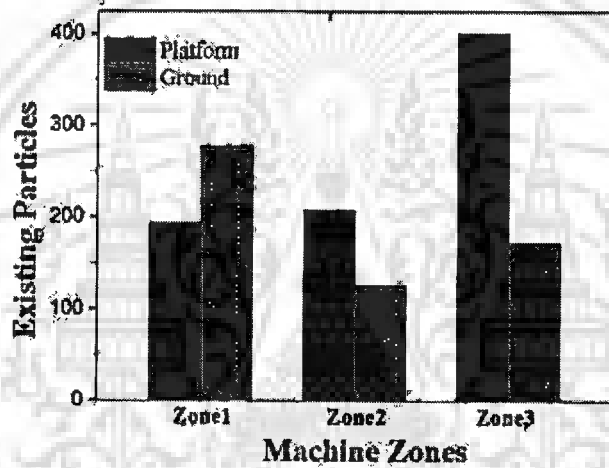


รูปที่ 3 (a) แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลของอากาศแบบเครื่องจักรยกพื้น  
(b) แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลของอากาศแบบเครื่องจักรไม่ยกพื้น

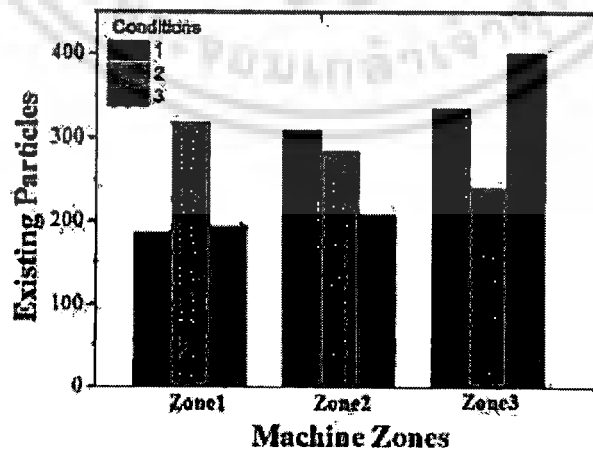
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงเวกเตอร์แสดงทิศทางของอนุภาคบนเบื่อนที่เคลื่อนที่ตามการไหลของอากาศ



รูปที่ 5 แสดงจำนวนอนุภาคที่ยังคงเหลืออยู่ในห้องสะอาดสำหรับกรณีเครื่องจักรแบบ Ground และ Platform



รูปที่ 6 แสดงจำนวนอนุภาคที่ยังคงเหลืออยู่ในห้องสะอาดสำหรับเงื่อนไข 1-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองห้องสะอาด A และ B

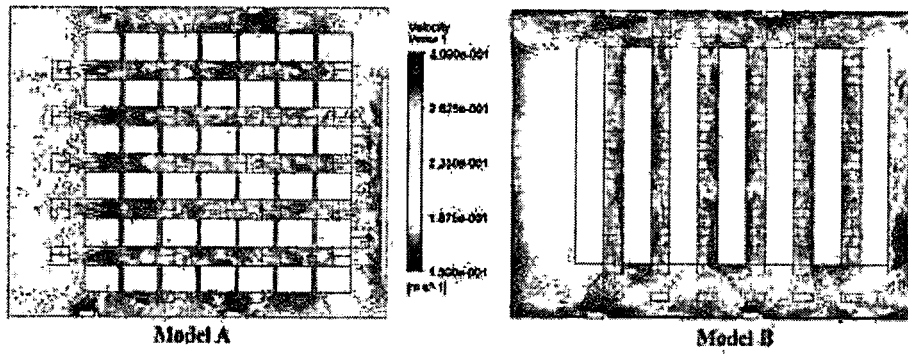
เพื่อที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายอากาศของทั้งสองแบบจำลอง เราแบ่งผลและอภิปรายออกเป็น 3 ส่วนคือ เปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการไหลของอากาศ ความเร็วของอากาศ และร่องรอยของอนุภาคหากมีการเคลื่อนที่

ในภาพที่ 5 แสดงลักษณะการไหลของอากาศในระนาบสูงจากพื้น 1 เมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ปฏิบัติงาน เราพบว่าที่ระนาบนี้ในแบบจำลอง B จะมีบริเวณที่อากาศมีการไหลวน (vortex) มากกว่าแบบจำลอง A อากาศไหลวนนี้หากเกิดขึ้นในห้องสะอาดจะทำให้อนุภาคลอยไปสะสม อาจทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนได้ เรายังพบอีกว่าในแบบจำลอง B อากาศต้องใช้เวลามากในการไหลจากตอนกลางของห้องไปยังด้านหน้า ด้านข้าง และหลังห้องซึ่งเป็นบริเวณที่มีช่องระบายอากาศออกอยู่ แล้วจึงไหลออกนอกห้อง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการวางของเครื่องจักรวางทางเดินของอากาศอยู่ อากาศจึงต้องไหลข้ามเครื่องจักรแต่ละแถวจึงจะผ่านไปยังช่องอากาศออกต่างๆได้ ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลอง A ซึ่งอากาศไหลผ่านเครื่องจักรทางด้านข้างได้หลายช่องทาง จึงใช้เวลาในการเดินทางน้อยกว่า นอกจากนี้เรายังได้สังเกตลักษณะการไหลของอากาศที่ระดับความสูงจากพื้นระนาบอื่นๆด้วย ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน

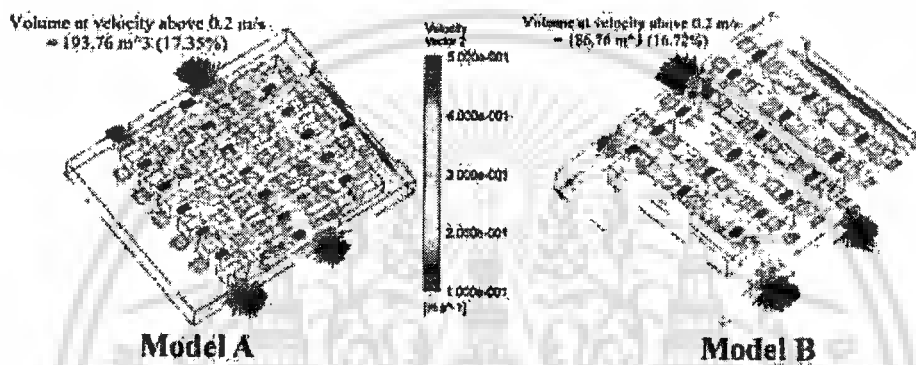
อากาศที่มีความเร็วสูงจะทำให้มีโอกาสที่พัดพาอนุภาคให้ออกจากห้องสะอาดได้เร็วกว่าอากาศที่มีความเร็วต่ำ ซึ่งโรงงานแห่งนี้กำหนดว่าความเร็วอากาศควรสูงกว่า 0.2 m/s ภาพที่ 6 แสดงบริเวณที่อากาศมีความเร็วมากกว่า 0.2 m/s ของทั้งสองแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง A มีปริมาตรอากาศบริเวณดังกล่าวอยู่ 17.35% ซึ่งสูงกว่าแบบจำลอง B เล็กน้อย ซึ่งมีเพียง 16.72% แม้ปริมาตรอากาศดังกล่าวจะต่างกันเพียง 0.63% แต่ถ้าเทียบกับปริมาตรอากาศทั้งห้องประมาณ 2,400 m<sup>3</sup> ถือว่ามีผลอย่างมากต่อโอกาสที่จะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคในขณะผลิต

สมมติว่ามีอนุภาคเกิดขึ้นระหว่างการผลิตในห้องสะอาด อนุภาคนั้นควรจะถูกพัดออกจากห้องสะอาด ห้องสะอาดที่มีประสิทธิภาพดีจะต้องมีอนุภาคหลงเหลืออยู่น้อยที่สุด โดยอนุภาคเหล่านี้อาจสะสมอยู่บริเวณที่อากาศไหลวน ภาพที่ 7 แสดงผลการจำลองเส้นทางของอนุภาค โดยแบ่งเครื่องจักรออกเป็น 3 บริเวณด้านหน้าห้อง กลางห้อง และหลังห้อง แล้วสมมติให้เครื่องจักรทั้ง 3 บริเวณดังกล่าวปล่อยอนุภาคสแตนเลสออกมาจำนวน 6,000 อนุภาค โดยแถบสีแสดงถึงเวลาในหน่วยวินาทีที่อนุภาคอยู่ในห้องสะอาด ซึ่งพบว่าทั้งแบบจำลอง A และ B อนุภาคส่วนใหญ่จะถูกพัดออกจากห้องสะอาดโดยใช้เวลาไม่ถึง 2 นาที มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ยังคงอยู่ ดังนั้นทั้งสองแบบจำลองมีความสามารถในการกำจัดอนุภาคใกล้เคียงกัน

เพื่อที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของทั้งสองแบบจำลองให้ละเอียดยิ่งขึ้น เราได้จำลองหาร่องรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยปล่อยอนุภาคสแตนเลส จำนวน 150,000 อนุภาค จำนวน 50 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ผลการจำลองแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าระบบการไหลของอากาศของทั้งสองแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาค โดยหากมีอนุภาคเกิดขึ้นจากเครื่องจักรขณะผลิต คาดว่าจะสามารถกำจัดอนุภาคเหล่านั้นได้สูงถึง 99.9% โดยแบบจำลอง B มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบจำลอง A เล็กน้อย หรือแทบไม่แตกต่าง แต่แบบจำลอง A สามารถวางเครื่องจักรได้ 96 ตัว ส่วนแบบจำลอง B วางเครื่องจักรได้เพียง 84 ตัว ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากข้อมูลทั้งหมด เราจึงแนะนำให้ทางโรงงานปรับปรุงห้องสะอาดโดยใช้เงื่อนไขการไหลของอากาศและการจัดวางเครื่องจักรตามแบบจำลอง A ซึ่งได้รับการยอมรับและถูกนำไปเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงห้องสะอาดเรียบร้อยแล้ว



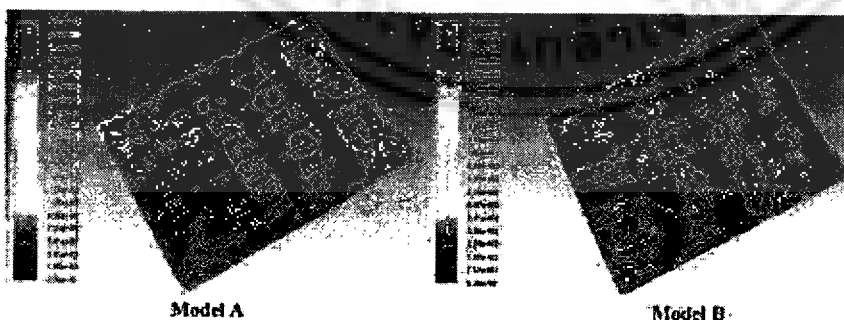
รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลของอากาศที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นห้อง



รูปที่ 8 แสดงบริเวณที่อากาศมีความเร็วสูงกว่า 0.2 m/s

ตารางที่ 5 จำนวนอนุภาคคงเหลือในห้องสะอาดเฉลี่ย จากการจำลองปล่อยอนุภาคเสตนเลส 150,000 อนุภาค จำนวน 50 ครั้ง

แบบจำลอง	จำนวนอนุภาคคงเหลือ (อนุภาค)
A	521 (0.116%)
B	473 (0.105%)



รูปที่ 9 แสดงเส้นทางจำลองร่องรอยของอนุภาคจำนวน 6,000 อนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เราได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาด 2 แบบ เพื่อหาแบบจำลองห้องสะอาดที่มีประสิทธิภาพลดการปนเปื้อนของอนุภาคได้ดีที่สุด โดยใช้ข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการจำลองจากห้องสะอาดจริง แบบจำลองทั้งสองแบบนี้แตกต่างกันที่ตำแหน่ง จำนวน เครื่องจักรที่อยู่ในห้องสะอาด และการจัดวางช่องอากาศต่างๆ ได้แก่ FFU, Ulpa Filter, Return Ceiling, Return Shaft และ Return Shaft Back ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ทั้งสองแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคที่อาจเกิดขึ้นได้ประมาณ 99.9% ของอนุภาคทั้งหมด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับบริเวณที่อาจเกิดมลวน ความเร็วอากาศบริเวณต่างๆ และอนุภาคที่อาจหลงเหลือในห้องสะอาด เราพบว่าแบบจำลอง A มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ปรับปรุงห้องสะอาดของโรงงานที่มีอยู่ในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพลดการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นในขณะทำการผลิตได้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลผลิตที่ได้จากการวิจัย

ผลงานวิจัยนี้ได้มีการนำไปเสนอผลงานในระดับชาติดังต่อไปนี้

#### การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- ได้นำไปเสนอผลงานแบบปากเปล่าที่งานประชุม International Engineering Conference (IENC2016) ที่จังหวัดขอนแก่น
- J. Thongsi, M. Pimsarn, W. Tangsopa, Using CFD to find the best placement of HDD production machinery for major renovation of factory clean room, KKU Engineering Journal, Vol. 43, S1-S3, 2016. (เอกสารหมายเลข 1)

#### การประชุมวิชาการระดับชาติ

- ได้นำไปเสนอผลงานแบบปสเตอร์ที่งานประชุม The 4<sup>th</sup> Academic Science and Technology Conference (ASTC2016)
- สมภพเงาฉาย ธรรมบุญ แก้วกลิ่น กิตตินันท์ เกษงาม กมลชนก คงทน สุนิสา โพธิ์เงิน และจตุพร ทองศรี, การจำลองการไหลอากาศเพื่อหาการวางเครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงห้องสะอาดอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 4, 31 พฤษภาคม 2559, AS-070. (เอกสารหมายเลข 2)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ขอทุนวิจัยไว้ 70,000 ข้อกำหนดคือตีพิมพ์ผลงานวิจัยวิจัยในระดับนานาชาติ ซึ่งเราได้ตีพิมพ์ใน KKU Engineering Journal ซึ่งได้รับการอ้างอิงใน TCI กลุ่มที่ 1 นอกจากนี้เรายังได้นำเนื้อหาบางส่วนไปเสนอผลงานในการประชุมระดับชาติอีกด้วย จึงถือว่างานวิจัยของเรา “สูงกว่ามาตรฐาน” ที่ทางทุนวิจัยได้กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- Noh, K. C., Kim, H. S. & Oh, M. D. (2010) Study on contamination control in a minienvironment inside clean room for yield enhancement based on particle concentration measurement and airflow CFD simulation, *Building and Environment*, 45, 825-831.
- Lui, J., Wang, H. & Wen, W. (2009) Numerical simulation on a horizontal airflow for airborne particles control in hospital operating room, *Building and Environment*, 44, 2284-2289.
- Thongsri, J. & Khaikom, A. (2014) Successful simulation of airflow in the microenvironment of an assembly automation machine and its implication, *Advanced Materials Research*, 931-932, 1063-1067.
- Thongsri, J. & Pimsarn, M. (2015) Optimum airflow to reduce particle contamination inside welding automation machine of hard disk drive production line, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(3), 509-515.
- Menter, F.R. (2009) Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 23(4), 305-316.
- ANSYS Fluent in *ANSYS Fluent User's Guide* 16.0 (2016)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารหมายเลข 1

- J. Thongsi, M. Pimsarn, W. Tangsopa, Using CFD to find the best placement of HDD production machinery for major renovation of factory clean room, KKU Engineering Journal, Vol. 43, S1-S3, 2016. (to be published soon)



1 Using CFD to find the best placement of HDD production machinery for major  
 2 renovation of factory clean room  
 3 Jatuporn Thongari<sup>1\*</sup>, Monsak Pingsarn<sup>2</sup> and Worapol Tangsopa<sup>1</sup>  
 4 <sup>1</sup>Computer Simulation in Engineering Research Group, College of Advanced Manufacturing  
 5 Innovation, <sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
 6 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.  
 7 Email address: jatuporn.th@kmitl.ac.th  
 8

9  
 10 **Abstract**

11 HDD production needs to be done in a clean room that keeps particulate  
 12 contamination to the minimum. In planning a renovation of a clean room in an HDD factory  
 13 in Thailand, a question came up whether to put components of HDD production machinery  
 14 on raised platforms or keep them on the floor level in order to better minimize contamination.  
 15 This study was conducted to find the answer using computational fluid dynamics (CFD)  
 16 simulation software, Ansys Fluent, combined with the real ventilation conditions planned for  
 17 the clean zone. The simulated results showed that keeping the machinery in the same level  
 18 with the floor is more effective.  
 19

20 **Keywords:** Computational Fluid Dynamics, CFD, Clean Room, Airflow, Particle Contamination  
 21

22 **1. Introduction**

23 Minute airborne particles lodging on small hard disk drive parts can render a hard disk drive  
 24 (HDD) unusable. Therefore, HDDs need to be manufactured in a clean room that complies to  
 25 US FED STD 209E standard [1], such as clean room class 1000 that is most widely used in  
 26 HDD production industry. Clean room class 1000 allows not more than 1000 of 0.5 micron  
 27 particles in one cubic foot of air. Although this class of clean room guarantees low particulate  
 28 contamination in the room, in general, additional measures need to be taken to ensure that clean  
 29 zones in the room are as free of contaminated particles as possible.

30 This study was born out of a collaboration between the authors and the researchers at an  
 31 HDD factory in Thailand in an effort to plan out a major renovation of its clean room for it to  
 32 be as effective as possible. Originally, the class 1000 clean room was built to the standard of  
 33 its day and has been operating effectively. However, as time passed and more and more new  
 34 machines were introduced into the room, the level of particulate contamination became higher,  
 35 so a major renovation of the ventilation system was needed, not only for taking care of the  
 36 immediate problem but also for supporting the operation of even more modern machines that  
 37 would be introduced later.

38 To have an idea of what kind of air flow pattern and level of contamination in the to-be-  
 39 renovated clean room would be, the computational fluid dynamics (CFD) simulation was  
 40 employed. CFD can be used to simulate airflow in a clean room under conditions and with  
 41 parameters that imitate those of the to-be-renovated room, such as its room plan, machine  
 42 location, and ventilation system and operation parameters. To date, CFD has been widely  
 43 applied to numerous problems and in many research studies. For example, CFD was

44 successfully applied to reduce particulate contamination during production in clean rooms  
 45 [2,3]. Lui et al.[4] used CFD to investigate the effects of medial lamp and thermal plume on  
 46 the airflow in a medical operating room and were able to apply the results to reduce the number  
 47 of infection incidents. Recently, authors, Thongsri and Pimsarn [5,6] has used CFD to simulate  
 48 the air flow and particle trace over and around a piece of HDD machinery in an HDD factory  
 49 in order to determine the best airflow setup later adopted by the factory.

50 Encouraged by the above successes, this study used CFD to simulate the airflow in a clean  
 51 room in an HDD factory under conditions and with parameters that imitate those of the room  
 52 in order to find the answers to the following questions: "Does it make any difference to the  
 53 airflow if pieces of machinery are put on a raised platform versus if they are kept level with the  
 54 ground? If so, how are the differences?" and "What are the most effective setup conditions and  
 55 parameters of the ventilation system to minimize particulate contamination?"

## 56 2. Theoretical Background

57 Mathematically, airflow pattern can be determined by a system of differential equations—  
 58 conservation equations and turbulence equations [7]—while particle trace can be determined by  
 59 the following particle force balance equation [8].  
 60

$$61 \quad \frac{du_p}{dt} = F_d(u_g - u_p) + g(\rho_p - \rho_g)/\rho_p + F_e \quad (1)$$

62 where  $p$  and  $g$  represent particle and fluid, respectively,  $F_d$  is drag force acting on the particle,  
 63  $F_e$  is another external force such as the Saffman lift force, and  $\rho_p \gg \rho_g$  so only Saffman lift  
 64 force is significant.  $u$  is velocity.

65 Inlet and outlet airflow conditions are according to a mass flow rate equation.

$$66 \quad \text{mass flow rate (kg/s)} = \rho Av \quad (2)$$

67 where  $A$  is cross-sectional area that air flows through and  $v$  is velocity perpendicular to that  
 68 area.

69 For particle trace investigation, we modeled the simulated particles as a stainless steel  
 70 particle, the kind of particle most often found in the factory, whose diameter and density were  
 71  $0.5 \mu\text{m}$  (which was considered very small) and  $8,000 \text{ kg/m}^3$  (which was many folds higher than  
 72 the density of air of  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ), respectively.

73 Airflow simulation was one-way, done with FLUENT 16.0 software. A shear stress  
 74 transport turbulent model widely used in the industry [9] was used with mass flow rates and air  
 75 outflow conditions that reflect the actual measured values obtained on site. After airflow  
 76 simulation was completed, traces of particles simulated by a discrete phase model and released  
 77 from selected places were determined. The simulation results were expected to be reliable and  
 78 able to address the research questions adequately.

79

80

81

### 3. Methodology

We constructed a basic model of airflow in a clean room with conditions and parameters that imitated those of the real clean room in the HDD factory. Then, we constructed a fluid model out of it, shown in Fig. 1, that included rectangular boxes representing pieces of machinery which were either raised on a platform 10 cm above the ground or kept level with the ground as well as locations of ventilation inlets from fan filter units (FFUs) and ultra-low particulate air (ULPA) filter and outlets to return air shafts and grilles. In addition, air could leak out from 3 sides of the clean zone to 3 neighboring zones. We called these sides 'outflow openings'.

#### 3.1 Mesh Model

Out of the fluid model shown in Fig. 1, we constructed 6 mesh models with different numbers of tetrahedron elements (5.94-9.06 millions) and nodes (1.14-1.68 millions). All of these mesh models were put through a mesh analysis and it was found that the mesh model, shown in Fig. 2 that was constructed with 8.07 million elements and 1.42 million nodes was the best model in terms of the quality of the results and computation time.

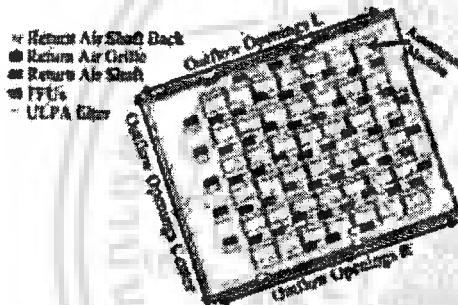


Figure 1 A model of the clean zone

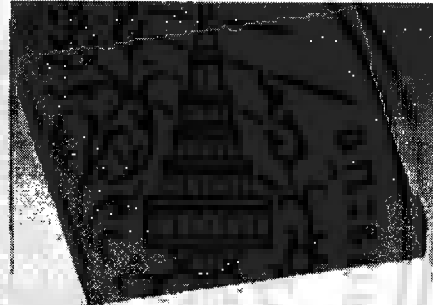


Figure 2 Mesh model

#### 3.2 Fluent Settings

Fluent software was set up with certain mass flow rates and air inlet and outlet conditions and parameters listed in Table 1 and 2. Three air outlet conditions were investigated in order to find one that yielded the best airflow.

Table 1 Air outlet conditions and parameters

Outlet	Size (m <sup>2</sup> )	Numbers	Percentage of total outflow (%)		
			Condition 1	Condition 2	Condition 3
Return air grille	1.2x0.6	18	45	43	39
Return air shaft, back side	1.1x0.4	12	18	16	14
Return air shaft, L1 and L2	1.1x0.4	2	8(6)	6(4)	5(3)
Return air shaft, R1 and R2	1.1x0.4	2	8(7)	6(5)	5(4)
Outflow Openings, L and R	40x3	2	2(2)	6(6)	8(8)
Outflow Opening, Center	20.4x3	1	4	8	14

114

115 Table 2 Air inlet conditions and parameters

Inlet	Size (m <sup>2</sup> )	Numbers	Temperature(°C)	Mass Flow Rate (kg/s)
FFUs	1.2x0.6	36	13	9.84
ULPA Filter	1.2x0.6	36	20.5	11.43

116

117

118

119

120

121

Other settings included 'coupling' for pressure-velocity option and 'second order upwind' for momentum, turbulence kinetic energy, and turbulence dissipation options, and 'steady state' for simulation option. The total number of iterations was set to 1000.

122

123

124

125

126

127

#### 4. Validation

We validated the reliability of our model by comparing theoretical results of outflow air velocities at the return shafts according to Eq. (2) with simulation results under Condition 2 in Table 2. The comparison results are shown in Table 3.

Table 3 Comparison of outflow air velocities at return shafts between values obtained from theoretical calculation versus simulation.

Shaft	Velocity (m/s)		Error
	Theoretical	Simulated	
Return shaft L1	2.40	2.48	3.33%
Return Shaft L2	1.58	1.62	2.53%
Return Shaft R1	2.40	2.47	2.92%
Return Shaft R2	1.97	2.02	2.54%

128

129

130

131

132

133

It can be seen there that the maximum discrepancy was only 3.33%. Moreover, the simulated airflow patterns from the FFUs and ULPA filter into the clean zone, over the pieces of machinery, and out of the zone through the return air shafts, grilles, and outflow openings were in agreement with the actual patterns observed on site. All of these suggested that our simulation results would be reliable.

134

135

136

137

138

139

140

#### 5. Results and Discussion

Regarding the answer to our first research question, the simulation results in Fig. 3 showed that keeping the pieces of machinery on the same level with the floor is better than putting them on a raised platform because strong vortices formed around the machines and beneath the platform at the 7-cm high XY-plane as well as at 3 and 9-cm XY-planes but at lower air velocities. These kinds of vortices were not formed at all around machines that are kept on the same level with the floor.

141

142

143

144

145

Regarding the investigation of the amount of unpurged particles from the clean zone, we simulated releases of 6,000 stainless steel particles from pieces of machinery located in 3 areas—Area 1: the back of the clean zone, Area 2: the middle of the zone, and Area 3: the front of the zone. The simulation was done in one area at a time, and the illustrated results are shown in Fig. 4.



146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

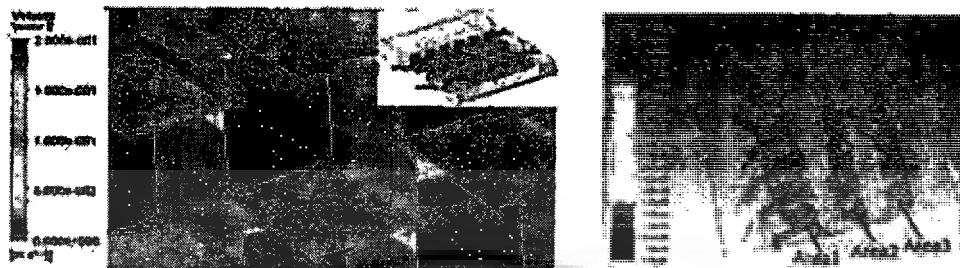


Figure 3 Air velocity vectors beneath raised platforms      Figure 4 Traces of released particles

157

158

159

160

161

162

The trace of each particle in Fig. 4 is color-coded according to its residence time in the clean zone. It can be seen that most of the particles in every area got purged out quickly through the return air shafts and grilles. Only a few stayed for a longer time which might be due to vortices and/or insufficient air velocities. To confirm these results, we repeated the simulation 50 times for each area with 150,000 released particles and counted the number of unpurged particles. The counts are shown in Fig. 5.

163

164

165

166

167

168

169

Like the previous results, these results showed that most of the released particles got purged. Only fewer than 420 particles did not get purged. Moreover, they showed that the number of unpurged particles for the case of keeping the pieces of machinery on the same level with the floor was fewer than those for the case of putting the pieces of machinery on raised platforms. When we reported this finding to the researchers at the HDD factory, they were very pleased because not only can they have a fewer number of unpurged particle but they can also save a lot of investment money on expensive vibration stands for raised platforms.

170

171

172

173

174

175

176

177

178

Regarding the best air flow condition for minimizing contamination among the three listed in Table 2 (for the case of keeping the pieces of machinery on the same level with the floor), a particle trace simulation was done with each condition, and the numbers of unpurged particle counts under all of the conditions were obtained, shown in Fig. 6.

It was found that the numbers of unpurged particles in the three areas varied, most likely due to the differences in relative locations of the return air shafts and grilles to each of the areas, but on average, Condition 3 yielded the fewest number of unpurged particles. This finding was also welcomed by the researchers at the factory because it agreed with a result of an empirical test that they had conducted.

179

180

181

182

183

184

185

186

## 6. Conclusion

In this study, CFD was used to simulate airflow in a clean room in an HDD factory in order to find the best placement for HDD production machinery and the best air ventilation system's setup conditions and parameters for minimizing particulate contamination. The simulation results showed that placing pieces of machinery on the same level with the floor is better than placing them on raised platforms. Condition 3 is the most effective setup conditions to minimize particulate contamination.

## เอกสารหมายเลข 2

- สมภพเงาฉาย ธรรมบุญ แก้วกลิ่น กิตตินันท์ เกษงาม กมลชนก คงทน สุนิสา โพธิ์เงิน และจตุพร ทองศรี, การจำลองการไหลอากาศเพื่อหาการวางเครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงห้องสะอาดอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 4, 31 พฤษภาคม 2559, AS-070.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลอากาศเพื่อหาการวางเครื่องจักรที่เหมาะสม  
สำหรับการปรับปรุงห้องสะอาดของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์  
Airflow Simulation to Find the Optimal Placement of Machinery  
for Renovation of HDD Manufacturing Clean Room

สมภพ เงามาชา ธรรมบุญ แก้วกัลยา นิตินันท์ เกษงาม กมลชนก ตถาน สุเมธา โทษะเงิน และจตุพร ทองศรี\*  
S. Ngasochai, T. Kaewklan, K. Kesngam, K. Kongthon, S. Po-ngem, and J. Thongsri\*  
Computer Simulation for Engineering Research Group, College of Advanced Manufacturing Innovation,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520  
\*E-mail: jatu.pom.th@gmail.com

**บทคัดย่อ**

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะผลิตในห้องสะอาดที่ได้มาตรฐานมีการปนเปื้อนของอนุภาคน้อยที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จำลองการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดของโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แห่งหนึ่ง ที่วางแผนจะถูกปรับปรุง เพื่อทราบแผนผังการติดตั้งเครื่องจักรในห้องสะอาดที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมจริงของโรงงาน เราได้สร้างแบบจำลองห้องสะอาด 2 แบบตามแผนผังและตามความต้องการของโรงงาน ผลการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแสดงการไหลของอากาศ และร่องรอยอนุภาคภายในห้องสะอาดของแต่ละแบบ ผลการจำลองเหล่านี้สอดคล้องกับข้อมูลเบื้องต้นที่ทางโรงงานรวบรวมไว้ ผลการวิเคราะห์นำไปสู่การตัดสินใจเลือกรูปแบบการวางเครื่องจักรที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ปัจจุบันผลจากงานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับการปรับปรุงห้องสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

**คำสำคัญ:** ห้องสะอาด พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การปนเปื้อน การไหลของอากาศ การผลิต

**Abstract**

Hard disk drive (HDD) production needs to be manufactured in a clean room that keep particulate contamination to the minimum. Therefore, this research aimed to apply the computational fluid dynamics (CFD) to simulate airflow inside a clean room of an HDD factory that planned to be renovated. To find the optimal placement of machinery under actual environmental conditions of the factory, 2 models of clean room subject to the layout and the requirement of factory were created. The results from CFD simulation revealed airflow and particle traces inside the clean room of each model. These results agree with preliminary data collected by the factory. Analytical results lead to the decision to choose the optimal placement of machinery with efficiency to reduce particle contamination in the manufacturing process. Presently, the results from this research are applied to practical applications for renovation of HDD manufacturing clean room.

**Keywords:** clean room, computational fluid dynamics, contamination, airflow, manufacturing

**บทนำ**

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ที่ใหญ่ของโลก เนื่องจากส่วนประกอบต่างๆที่อยู่ในฮาร์ดดิสก์โครที่มีขนาดเล็กลง ดังนั้นผู้ประกอบฮาร์ดดิสก์อาจเป็นสาเหตุทำให้ฮาร์ดดิสก์โครที่ผลิตไม่ได้มาตรฐาน ไม่สามารถทำงานได้ ด้วยเหตุนี้ ฮาร์ดดิสก์โครที่จึงต้องผลิตในห้องสะอาดที่ได้ตรงตามมาตรฐาน US FED STD 209E เช่น ห้องสะอาด คลาส 1000 ซึ่งเป็นห้องสะอาดส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมการผลิต HDD ได้กำหนดให้มีอนุภาคขนาด 0.5 ไมครอนได้ไม่เกิน 1,000 อนุภาค ต่อปริมาตรอากาศ 1 ลูกบาศก์ฟุต หรือคลาส 100 อนุภาคในลิตรอนุภาคขนาดดังกล่าวได้ไม่เกิน 100 อนุภาค เป็นต้น ทั้งนี้ทางโรงงานจึงหาวิธีการต่างๆที่จะควบคุมระดับการปนเปื้อนของอนุภาคในห้องสะอาดให้มีลักษณะตามที่ได้ออกกำหนดไว้

งานวิจัยที่นี้เป็นประเด็นการที่ได้จากงานวิจัยร่วมของนักวิจัยกับโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์โครที่หนึ่งในประเทศไทย เริ่มเมื่อก่อตั้งโรงงาน ห้องสะอาดของโรงงานแห่งนี้ได้สร้างถูกต้องตามมาตรฐานคลาส 1,000 ซึ่งใช้ผลิตฮาร์ดดิสก์โครที่ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเวลาผ่านไปห้องสะอาดดังกล่าวกลับมีการปนเปื้อนที่มากขึ้นเรื่อยๆจากจำนวนเครื่องจักรในห้องที่เพิ่มมากขึ้น และระบบระบายอากาศที่ไม่ทันสมัย ทำให้ห้องสะอาดไม่ได้มาตรฐานตามที่ต้องการ นอกจากนี้ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์โครที่มีความจุ และประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงต้องการกระบวนการผลิตที่ทันสมัยมากขึ้น ทางนักวิจัยจึงต้องการปรับปรุงกระบวนการผลิตใหม่ โดยต้องการปรับปรุงระบบการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดให้มีประสิทธิภาพของการปนเปื้อนของอนุภาคขณะผลิตได้ เพื่อให้รอบเครื่องจักรผลิตที่มีเทคโนโลยีขั้นสูงใหม่มาใช้แทนเครื่องเก่าที่จะถูกนำออกไปจากโรงงาน ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้เสนอหาโรงงานว่าควรใช้กลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) จำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาดภายใต้เงื่อนไขจริงที่ได้จากโรงงานจริง เช่น มีห้องสะอาด ระบบการไหลของอากาศภายใน ค่าพารามิเตอร์ความเร็วลม และเงื่อนไขระบบระบายอากาศ ซึ่งค่าที่โรงงานต้องการจะได้จะสามารถนำไปประยุกต์หาเงื่อนไขต่างๆที่เหมาะสม เพื่อใช้ปรับปรุงระบบการผลิตให้มีประสิทธิภาพของการปนเปื้อนของอนุภาคที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ผู้เขียนได้ศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้ CFD ในงานทางด้านนี้มากมาย เช่น Noh และคณะ (Noh et al., 2010) ได้ใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาดของอุตสาหกรรมการผลิต LCD ผลการจำลองนำมาใช้จัดการการปนเปื้อนของอนุภาคขณะผลิตได้ Lu และคณะ (Lu et al., 2009) ได้ใช้ CFD ศึกษาผลกระทบของลมพัดที่มีต่อการไหลของอากาศในห้องสะอาดซึ่งสามารถคาดการณ์ได้และไม่ให้ค่าผิดได้ และเมื่อไม่นานมานี้ คณะผู้วิจัย (Thongkiet et al., 2014, 2015) ได้ใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศและร่องรอยของอนุภาคในเครื่องจักรเพื่อหาเงื่อนไขการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์โครได้จริง

ในบทวิจัยนี้จะใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาด 2 แบบที่คาดว่ามีความเหมาะสมจะนำไปใช้เป็นแบบในการปรับปรุงห้องสะอาดในปัจจุบัน ภายใต้เงื่อนไขการระบายอากาศสองวิธีที่รวบรวมได้จากห้องสะอาดของโรงงานอุตสาหกรรม ผลการจำลองจะถูกรวบรวมความถูกต้องโดยเทียบกับที่ได้จากทฤษฎี และจากนั้นจะนำไปเปรียบเทียบ และวิเคราะห์เพื่อหา รูปแบบแผนผัง และเงื่อนไขการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งก็มีประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของอนุภาค เพื่อให้เป็นที่ยอมรับในการปรับปรุงห้องสะอาดของโรงงานที่มีอยู่ในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นต่อไป

**ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**

รูปแบบการไหลของอากาศในห้องสะอาดได้จากการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของสมการอนุรักษ์ (conservation equations) และสมการความปั่นป่วน (turbulence equation) ซึ่งรูปแบบของสมการดังกล่าวสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง (Ansys 16.0, 2016) ส่วนการต่อของเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle trace) คำนวณจากสมการสมดุลอนุภาค (particle force balance equation) ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$du_p/dt = F_d(u_g - u_p) + g(\rho_p - \rho_g)/\rho_p + F_r \tag{1}$$

ที่ความเร็ว  $u$  และ  $g$  คือค่าแรงของอนุภาคและของไหลตามลำดับ  $F_d$  คือแรงลากที่กระทำต่ออนุภาค  $F_r$  แสดงถึงแรงกระทำอื่นๆซึ่งรวมถึงแรงของ Saffman ด้วย เนื่องจาก  $\rho_p \gg \rho_g$  ดังนั้น แรงที่กระทำต่ออนุภาคในโมเดลนี้จะมีแรงลากและแรงของ Saffman เท่านั้น

สำหรับเงื่อนไขของอากาศเข้า (inlet) และอากาศออก (outlet) จะเป็นไปตามสมการ mass flow rate นั่นคือ

$$\text{mass flow rate (kg/s)} = \rho Av \tag{2}$$

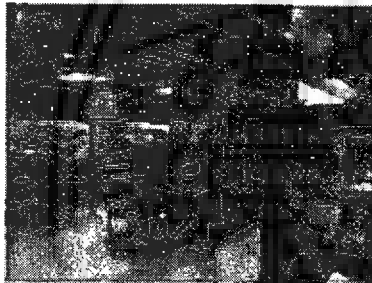
เมื่อ  $A$  คือพื้นที่ที่อากาศไหลผ่าน และ  $V$  คือความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดนั้นแบบตั้งฉาก

เพื่อที่จะจำลองเส้นทางของอนุภาค และแพร่กระจายของอนุภาค ซึ่งใช้วิเคราะห์ปัญหาการปนเปื้อนได้ เราได้นำอนุภาค  
ขนาดเฉลี่ยหนึ่งไมครอนที่พบอยู่ในโรงงาน และทำให้เกิดการปนเปื้อนมาเป็นกรณีศึกษา โดยมีคุณสมบัติให้มีขนาดเฉลี่ย  
น้ำหนักประมาณ 0.5 ไมครอน ซึ่งถือว่าเล็กมาก และมีความหนาแน่น 8,000 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งมากกว่าความหนาแน่นของอากาศ 1.225  
kg/m<sup>3</sup> หลายเท่า ดังนั้นเราจึงได้ใช้การจำลองแบบทางเดียว (one way simulation) นั่นคือคำนวณการปนเปื้อนการไหลของอากาศ  
ในเครื่องจักรด้วยโปรแกรม FLUENT 16.0 ด้วยแบบจำลองความเป็นปฏิกิริยา Shear Stress Transport โดยใช้เงื่อนไขของอากาศเข้า  
โดยการกำหนด mass flow rate และเงื่อนไขอากาศออกแบบ outflow ซึ่งได้จากการทดลองที่วัดจริงในห้องสะอาดของโรงงาน  
เมื่อได้รูปแบบการไหลของอากาศแล้วจึงใส่ข้อมูลอนุภาคเข้าไปโดยใช้ Discrete phase model พร้อมกับโปรแกรมจึงแสดงผลในการ  
การเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งทำให้อันที่ได้จะมีลักษณะเป็นเม็ด และเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาในงานวิจัยนี้ (Menter, 2009)

**กระบวนการวิจัย**

**แบบจำลองห้องสะอาด**

เราต้องการปรับปรุงห้องสะอาดของโรงงานดังกล่าวที่ 1 จากการผลิต และตรวจสอบระบบการไหลของอากาศ  
ภายในห้องนั้น เราได้ศึกษาแบบจำลองห้องสะอาดแบบใหม่ที่คาดว่าเหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการของทางโรงงาน 2 แบบ  
เรียกว่าแบบจำลอง A และ B ทั้งสองแบบเครื่องจักรที่ติดตั้ง มีระบบการระบายอากาศประกอบไปด้วยห้องสะอาดไหลเข้าหรือ  
ไหลออก 5 ชนิด ได้แก่ Fan Filter Unit (FFU), Ultra Filter, Return Ceiling, Return Shaft and Outflow โดยอากาศจะไหล  
เข้าทาง FFU และ Ultra Filter โดยจะไหลออกทาง Return Ceiling, Return Shaft และ Outflow ทั้งสองแบบจำลองจะมีการ  
จัดอากาศและชนิดเท่านั้น แตกต่างกันที่การจัดการตำแหน่งของห้องสะอาด และตำแหน่งการไหลของอากาศ จากข้อมูลที่ได้กล่าว  
มาทั้งนี้แบบจำลองที่นำมาสร้างแบบจำลองห้องสะอาดได้ 2 แบบคือแบบจำลอง A และแบบจำลอง B

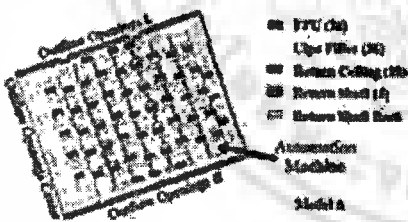


ภาพที่ 1 ห้องสะอาดที่ต้องการปรับปรุง

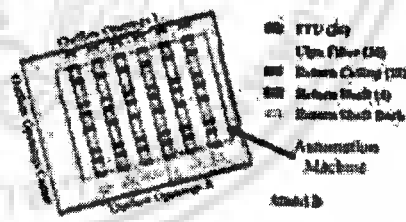
เราได้นำแบบจำลองห้องสะอาดในภาพที่ 2 และ 3 มาสร้าง  
แบบจำลองและชนิดที่จะเป็นน้ำ หรือจากทำการวิเคราะห์เมช (Mesh  
Analysis) แล้วจึงศึกษาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านของ  
คุณภาพของค่าที่ได้ออกมา และเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับแบบ A คือ  
1.83 วินาที และ 9.67 ชั่วโมงสำหรับแบบ B คือ 1.76 วินาที  
และ 9.34 ชั่วโมง และในภาพที่ 4

**การกำหนดเงื่อนไขค่าพาราม**

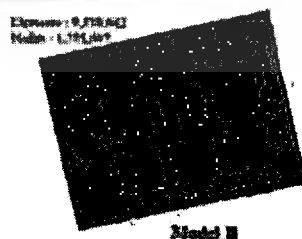
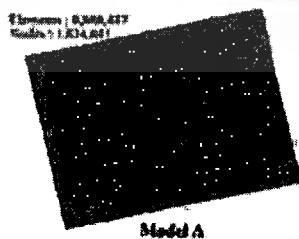
เราได้นำโปรแกรม Ansys Fluent 16.0 แบบจำลองความเป็นปฏิกิริยา  
แบบ Shear Stress Transport (SST) โดยใช้เงื่อนไขของอากาศมาเข้าสำหรับ  
ทั้งสองแบบจำลองเป็น mass flow rate ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 แบบจำลองห้องสะอาดแบบ A



ภาพที่ 3 แบบจำลองห้องสะอาดแบบ B



ภาพที่ 4 แบบจำลองอนุภาค

ตารางที่ 1 เดือนใช้อากาศในดงเข้า

Inlet (พื้นที่)	Size (m <sup>2</sup> )	Temp (C)	Mass Flow Rate (kg/s)
FFU	1.2x0.6	13	11.43
Utpa Filter	1.2x0.6	20.5	11.49

สำหรับเดือนใช้อากาศไหลออกจากห้องระบบจ่ายลม เรากำหนดให้เป็น outflow แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เดือนใช้อากาศในดงออก

Outlet	Size (m <sup>2</sup> )	Outflow (%)	Outlet	Size (m <sup>2</sup> )	Outflow (%)
Return Grille	1.2x0.6	39	Return Shaft R1(R2)	1.1x0.4	5(6)
Return Shaft Back	1.1x0.4	14	Outflow L(R)	40x3	8(8)
Return Shaft L1(L2)	1.1x0.4	5(3)	Outflow Center	20.4x3	14

อุณหภูมิของห้องสะอาดเป็น 24.5 °C มีมวลลม 101,250 ปาสคาล ส่วนค่าอื่นๆในโปรแกรมนี้ มีการตั้งค่าที่จะมี pressure-velocity เป็นแบบ coupling ส่วนค่า momentum, turbulence kinetic energy และ turbulence dissipation ตั้งค่าเป็น second order upwind ทั้งหมดเป็นการคำนวณแบบคงที่ (steady state) จำนวน 1,000 รอบ ผลการคำนวณจึงจะเข้า (converge)

**การตรวจสอบความถูกต้อง**

เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำเพื่อหาไอโซล และรูปแบบการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้ปรับปรุงห้องสะอาดที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของอนุภาคในมือขึ้น ดังนั้นเราจึงไม่มีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองที่ได้จากการวัดจริงได้ เนื่องจากห้องสะอาดจริงไม่ได้ถูกสร้างขึ้น ด้วยเหตุนี้เราจึงจะตรวจสอบผลการจำลองที่ทำการเปรียบเทียบความเร็วอากาศบริเวณช่องอากาศออก (outlet) ที่ได้จากการจำลองเทียบกับที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กฎปริมาตร (2) ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วอากาศบริเวณอากาศในดงออกบริเวณต่างๆที่ได้จากการจำลองเทียบกับที่ได้จากการสุญญ

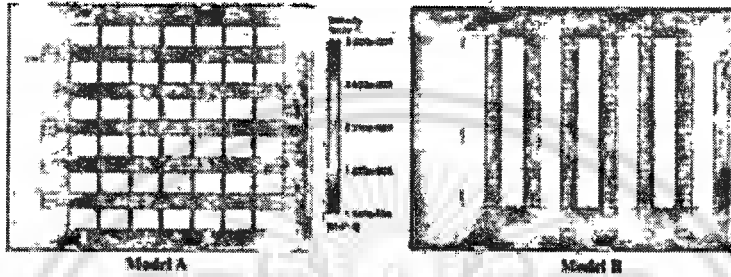
จุดอากาศ	ทฤษฎี (m/s)	แบบจำลอง A:		แบบจำลอง B:	
		จำลอง (m/s)	ความคลาด (%)	จำลอง (m/s)	ความคลาด (%)
Return Ceiling	0.56	0.52	7.14	0.57	1.79
Return Shaft Back	0.48	0.50	4.17	0.50	4.17
Return Shaft L1(L2)	2.08(1.25)	2.13(1.20)	2.40(2.40)	2.24(1.26)	7.69(0.80)
Return Shaft R1(R2)	2.08(1.66)	2.13(1.70)	2.40(2.41)	2.10(1.65)	0.96(0.60)

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าความเร็วอากาศจากการจำลอง และจากการสุญญที่ของแบบจำลองทั้ง A และ B มีความสอดคล้องกัน มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 7.69% นอกจากนี้เรายังได้ตรวจสอบลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องด้วยพบว่า อากาศจะไหลเข้าห้องสะอาดจาก FFU และ Utpa Filter และไหลออกจากห้องทาง Return Ceiling, Return Shaft และ Outflow พยายามที่จะไหลได้จากห้องสะอาดจริง จากข้อมูลทั้งหมดที่ได้กล่าวมา เราจึงถือว่าผลการจำลองมีความน่าเชื่อถือ

**ผลการทดลองและการอภิปราย**

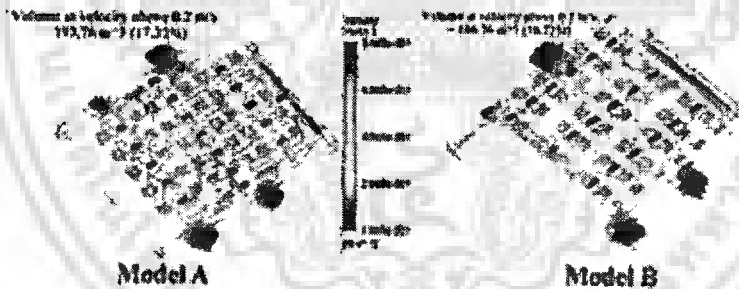
เพื่อที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายอากาศของห้องระบบจ่ายลม เราแบ่งและอภิปรายออกเป็น 3 ส่วนคือ เปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการไหลของอากาศ ความเร็วของอากาศ และร่องรอยของอนุภาคตามหลักการเดียวกัน

ในภาพที่ 5 แสดงลักษณะการไหลของอากาศในระนาบสูงจากชั้น 1 เมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ปฏิบัติงาน เราพบว่าที่ระบบเป็นแบบจำลอง B จะมีบริเวณที่อากาศมีการไหลวน (vortex) มากกว่าแบบจำลอง A อากาศไหลวนนี้ทำมาเกิดขึ้นในห้องจะพัดพาทำให้อนุภาคลอยไปสะสม อาจทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนได้ เรายังพบอีกว่าในแบบจำลอง B อากาศต้องใช้เวลามากในการไหลจากตอนกลางของห้องไปยังด้านหน้า ด้านข้าง และหลังห้องซึ่งเป็นบริเวณที่มีชื่อระนาบอากาศออกอยู่ แม้ว่ายังไม่ลดอุณหภูมิห้อง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการวางของเครื่องจักรวางทางด้านหลังของอาคารอยู่ อากาศจึงต้องไหลข้ามเครื่องจักรมาแค่จนกว่าจะระบายไปชั้นของอากาศออกต่างๆได้ ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลอง A ซึ่งอากาศไหลผ่านเครื่องจักรทางด้านข้างได้หลายช่องทาง จึงใช้เวลาในการเดินทางน้อยกว่า นอกจากนี้เรายังได้สังเกตลักษณะการไหลของอากาศที่ระดับความสูงจากพื้นระนาบชั้นต่างๆ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน



ภาพที่ 5 ลักษณะการไหลของอากาศที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นห้อง

อากาศที่มีความเร็วสูงจะทำให้มีโอกาสที่พัดพาอนุภาคให้ออกจากห้องระนาบได้เร็วกว่าอากาศที่มีความเร็วต่ำ ซึ่งโรงงานแห่งนี้กำหนดว่าความเร็วอากาศควรสูงกว่า 0.2 m/s ภาพที่ 6 แสดงบริเวณที่อากาศมีความเร็วมากกว่า 0.2 m/s ของทั้งสองแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง A มีปริมาณอากาศบริเวณดังกล่าวอยู่ 17.35% ซึ่งสูงกว่าแบบจำลอง B เล็กน้อย ซึ่งมีเพียง 16.72% แม้ปริมาณอากาศดังกล่าวจะต่างกันเพียง 0.63% แต่สัมพันธ์กับปริมาณอากาศทั้งหมดประมาณ 2,000 m<sup>3</sup> ถือว่ามีผลอย่างมากต่อโอกาสที่จะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคในขณะผลิต



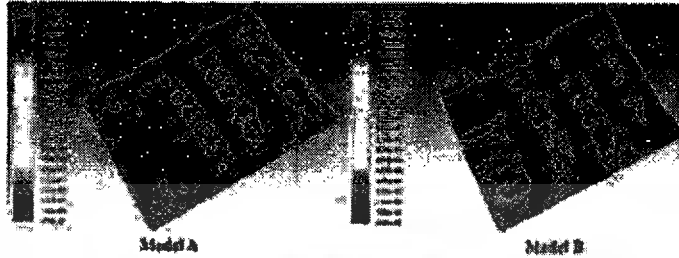
ภาพที่ 6 บริเวณที่อากาศมีความเร็วสูงกว่า 0.2 m/s

สมมติว่ามีอนุภาคเกิดขึ้นระหว่างการผลิตในห้องสะอาด อนุภาคนั้นควรจะถูกพัดออกจากห้องสะอาด ห้องสะอาดที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีอนุภาคนวลเหลือบ้อยที่สุด โดยอนุภาคนวลนี้มักจะสะสมอยู่ในบริเวณที่อากาศไหลวน ภาพที่ 7 แสดงผลการจำลองเส้นทางของอนุภาค โดยแบ่งเครื่องจักรออกเป็น 3 โซนตามด้านหน้าห้อง กลางห้อง และหลังห้อง แล้วสมมติให้เครื่องจักรทั้ง 3 บริเวณดังกล่าวปล่อยอนุภาคนวลแบบเลขยกกำลังจำนวน 6,000 อนุภาค โดยสมมติสมมติให้เวลาในการระบายอากาศในห้องสะอาด ซึ่งพบว่าทั้งแบบจำลอง A และ B อนุภาคนวลใหญ่จะถูกพัดออกจากห้องสะอาดโดยใช้เวลาไม่ถึง 2 นาที ในสัดส่วนน้อยเท่ากันที่ยังคงอยู่ ดังนั้นทั้งสองแบบจำลองมีความสามารถในการกำจัดอนุภาคใกล้เคียงกัน

เพื่อที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของทั้งสองแบบจำลองนี้จะเปรียบเทียบ เราได้จำลองการปล่อยอนุภาคเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยปล่อยอนุภาคนวลแบบเลขยกกำลัง จำนวน 150,000 อนุภาค จำนวน 50 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ผลการจำลองแสดงผลการวางที่ 4 พบว่าระบบการไหลของอากาศของทั้งสองแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาค โดยหากมีอนุภาคเกิดขึ้นจากเครื่องจักรขณะผลิต คาดว่าจะสามารถกำจัดอนุภาคนวลเหล่านี้ได้สูงถึง 99.9% โดยแบบจำลอง B มีประสิทธิภาพสูงกว่า, แบบจำลอง A เล็กน้อย หรือแทบไม่แตกต่างกัน แต่แบบจำลอง A สามารถวางเครื่องจักรได้ 96 ตัว ส่วนแบบจำลอง B วางเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เพียง 8% ตัว ซึ่งมีอัตราการกำจัดอนุภาคที่หมด เราจึงแนะนำให้ทางโรงงานปรับปรุงห้องสะอาดโดยใช้เงื่อนไขการไหลของอากาศและการจัดวางเครื่องจักรตามแบบจำลอง A ซึ่งได้รับการยอมรับและถูกนำไปเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงห้องสะอาดเรียบร้อยแล้ว



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบการจัดวางเครื่องจักรของอนุภาคจำนวน 6,000 อนุภาค

ตารางที่ 4 จำนวนอนุภาคที่เหลือในห้องสะอาดเฉลี่ย จากการจัดวางปล่อยอนุภาคบนแหล่ง 150,000 อนุภาค จำนวน 50 ครั้ง

แบบจำลอง	จำนวนอนุภาคที่เหลือ (อนุภาค)
A	521 (0.116%)
B	473 (0.105%)

**สรุปผลการวิจัย**

ในงานวิจัยนี้ เราได้ใช้ทฤษฎีของไหลเชิงคำนวณจำลองการไหลของอากาศในห้องสะอาด 2 แบบ เก็บตามแบบจำลองห้องสะอาดที่มีประสิทธิภาพลดการปนเปื้อนของอนุภาคได้ดีที่สุด โดยใช้ข้อมูลต่างๆที่จำเป็นสำหรับการจำลองจากห้องสะอาดจริงแบบจำลองที่มีสองแบบที่แตกต่างกันที่ค่าเฉลี่ย จำนวนเครื่องจักรที่อยู่ในห้องสะอาด และการจัดวางของอากาศต่างๆ ได้แก่ FFU, Ultra Filter, Return Ceiling, Return Shaft และ Return Shaft Back ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ทั้งสองแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคที่อาจเกิดขึ้นได้ประมาณ 99.9% ของอนุภาคทั้งหมด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเป็นบริเวณที่อาจเกิดคราบ ความเร็วอากาศบริเวณต่างๆ และอนุภาคที่อาจหลงเหลือในห้องสะอาด เราพบว่าแบบจำลอง A มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ปรับปรุงห้องสะอาดของโรงงานที่มีอยู่ในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพลดการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นในขณะทำการผลิตได้ดียิ่งขึ้น

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบริษัทซีเมท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด

**เอกสารอ้างอิง**

Noh, K. C., Kim, H. S. & Oh, M. D. (2010) Study on contamination control in a microenvironment inside clean room for yield enhancement based on particle concentration measurement and airflow CFD simulation, *Building and Environment*, 45, 825-831.

Lui, J., Wang, M. & Wen, V. (2009) Numerical simulation on a horizontal airflow for airborne particles control in hospital operating room, *Building and Environment*, 44, 2284-2289.

Thongsri, J. & Khachom, A. (2014) Successful simulation of airflow in the microenvironment of an assembly automation machine and its implication, *Advanced Materials Research*, 931-932, 1063-1067.

Thongsri, J. & Pimsorn, M. (2015) Optimum airflow to reduce particle contamination inside welding automation machine of hard disk drive production line, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(3), 509-515.

Menter, F.R. (2009) Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 23(4), 305-316.

ANSYS Fluent in ANSYS Fluent User's Guide 14.0 (2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)...ศ.ดร.จตุพร ทองศรี.....  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)...Dr. Jatuporn.Thongsri.....
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน...3320400026751.....
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์  
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร.02-329-8271, Fax.02-329-8263, Email: ktjatupo@kmitl.ac.th
- ประวัติการศึกษา  
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
ระดับปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ระดับปริญญาเอก วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนองานวิจัย

Titles	Researcher	Fund (Bath)	Budget (Bath)	Start /Expired Year	Finished Year
1.Simulation, Validation, and Evaluation of Cleaning Process in Ultrasonic Cleaning Tank.	Dr. Jatuporn (100%)	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	299,000	2559/2559	In Progress
2.Finite Element Analysis of Micro-Gripper for Handling Slider of Hard Disk Drive	Dr. Jatuporn (100%)	Research and Researcher for Industry	300,000	2558/2559	In Progress
3.Airflow Simulation in Clean Room for Hard Disk Drive Manufacturing Process	Dr. Jatuporn (100%)	Research and Researcher for Industry	300,000	2558/2559	In Progress
4. An Experiment and Simulation Study of Airflow and Temperature Distribution in Seagate Teparuk's Cleanroom	Dr. Jatuporn (100%)	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	370,300	2558/2558	In Progress
5. Thermal Study on a Printed Circuit Board (PCB) Applicable to Hard Disk Drive	Dr. Jatuporn (100%)	Cal-Comp Electro (Thai) Pub. Co. Ltd.	499,950	2557/2559	2558 Complete
6. Study of Airflow Characteristics inside a Computer Case and Its Application for Reducing Particle Contamination using CFD	Dr. Jatuporn (100%)	Cal-Comp Electro (Thai) Pub. Co. Ltd.	499,950	2557/2559	2558 Complete
7. Numerical investigation of airflow behavior inside a DSTAR clean room	Dr. Jatuporn (100%)	Development and	225,000	2557/2559	In Progress

		Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST)			
8. Study of Vibration Characteristics of a Thai Traditional Brass Gong	Dr. Jatuporn (100%)	College of Data Storage Innovation	40,000	2557/2558	2558 Complete
9. VENA Behavior Study Based on Hard Disk Drive Environment Test using FEM	Dr. Jatuporn (100%)	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	120,750	2557	2557 Complete
10. Airflow Simulation for Reflow, ULRT and ATAAP Machines using FEM	Dr. Jatuporn (100%)	Seagate Technology (Thailand) Ltd.	110,850	2557	2557 Complete
11. Effect of Environment on Airflow Simulation in Hard Disk Drive	Dr. Jatuporn (100%)	KMITL	170,000	2556	2558 Complete
12. Numerical Simulation of Particle Trajectory inside Automation	Dr. Jatuporn (100%)	College of Data Storage Innovation	150,000	2556	2558 Complete
13. Parametric Study of Head Stack Assembly (HSA) Vibration Characteristics	Dr. Jatuporn (50%)	KMITL, NSTDA and Seagate Technology (Thailand) Ltd.	3,712,700	2556	2558 Complete
14. Humidity and Temperature Behavior in VENA Chamber using FEM	Dr. Jatuporn (100%)	Seagate Technology (Thailand) Ltd	74,750	2556	2556 Complete

### ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติย้อนหลัง 3 ปี

- [1] J. Thongsri, V. Pongkom, A simulation of the Number of Particle Trapped by Circulating Filter of a Hard Disk Drive and Their Trajectories, *Appl. Mech. Mater.* Vol. 548-549, pp. 953-957, 2014.
- [2] J. Thongsri, W. Suksawaeng, Numerical Investigation of Airflow Behavior inside Environmental Chamber, *Adv. Mater. Res.* Vol. 931-932, pp.1048-1052, 2014.
- [3] J. Thongsri, V. Pongkom, Simulated Trajectories of Particles and the Number of Particles Trapped by the Circulating Filter in a Hard Disk Drive, *Adv. Mater. Res.* Vol. 931-932, pp.1058-1062, 2014.
- [4] J. Thongsri, A. Kaokom, Successful Simulation of Airflow in the Microenvironment of an Assembly Automation Machine and its Implication, *Adv. Mater. Res.* Vol. 931-932, pp.1063-1067, 2014.
- [5] J. Thongsri, Effect of Grain Size on Effective Permittivity of Ferroelectric Films based on Effective Medium Theory, *Appl. Mech. Mater.* Vols. 619, pp. 188-192, 2014.
- [6] J. Thongsri, M. Pimsarn, Optimum Airflow to Reduce Particle Contamination Inside Welding Automation Machine of Hard Disk Drive Production Line, *Int. J. Precis. Eng. Man.* Vol. 16, No.3, pp. 509-515, 2015.
- [7] J. Thongsri, Comparison of  $k-\epsilon$  Turbulence Models for Predicting Airflow in 3.5-inch Dual Platter Hard Disk Drive, *Int. Conf. Engineering Applied Science and Technology*, Bangkok, Thailand, (2013) 1-5
- [8] V. Puengkhom, J. Thongsri, M. Pimsarn, On Finite Element Modeling Aspect of HDD's Head Stack Assembly Vibration Analysis, *Proc. The 5<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Chiang Mai, Thailand, AMM055, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[9] J. Thongsri. Numerical Investigation of Airflow inside an Environmental Chamber for HGA Mechanical Test and a Scheme for Improving the Flow, ARPN. J. Eng. Appl. Sci. Forth. coming in Dec. 2015



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้